第 37 卷第 2 期
2017 年 1 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.2
Jan.,2017

DOI: 10.5846/stxb201508111692
向元彬,周世兴,肖永翔,胡庭兴,涂利华,黄从德,高保丹.模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林凋落物分解的影响.生态学报,2017,37(2):455-463.
Xiang Y B, Zhou S X, Xiao Y X, Hu T X, Tu L H, Huang C D, Gao B D.Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on litter decomposition in an evergreen broad-leaved forest in the rainy area of western China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):455-463.

模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林凋落物分解的影响

向元彬,周世兴,肖永翔,胡庭兴,涂利华,黄从德*,高保丹
四川农业大学林学院,四川省林业生态工程省级重点实验室, 成都 611130

摘要:从 2013 年 11 月至 2015 年 5 月,采用凋落物分解袋法,设置了对照(CK)、氮沉降(N)、减雨(R)、增雨(A)、氮沉降+减雨(NR)、氮沉降+增雨(NA)6 个处理水平,研究了模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林凋落物分解的影响。结果表明:华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解较快,凋落枝分解较慢;凋落物夏季分解较快,其他季节分解较慢。经过 18 个月的分解后,凋落叶和枝的质量残留率分别为 45.86%和 86.67%,凋落叶分解 50%需要的时间为 1.42 a,比枝短 6.19 a。各处理凋落物叶分解系数表现为:k(A)>k(CK)>k(NA)>k(N)>k(R)>k(NR),凋落枝质量残留率表现为:N>NR>R>NA>CK>A。模拟氮沉降、减雨和增雨处理凋落叶分解 50%分别需要 1.79、1.94a 和 1.36a,凋落枝分解 50%分别需要 8.84、8.63 a 和 6.47 a。各处理凋落叶分解 95%需要 5.37—11.33 a,凋落枝分解 95%需要 27.41—33.84 a。同一氮沉降条件下,增雨处理促进凋落叶分解,减雨处理抑制凋落叶分解;同一降雨条件下,氮沉降抑制凋落叶分解。氮沉降或降雨对凋落物的分解产生显著影响(P<0.05),其交互作用影响不显著(P>0.05)。可见,在氮沉降持续增加和降雨格局改变的背景下,增雨促进了华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落物的分解,氮沉降和减雨抑制了凋落物的分解,模拟氮沉降和降雨对凋落物的分解交互作用表现不明显。

关键词:氮沉降;降雨;常绿阔叶林;凋落物分解

Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on litter decomposition in an evergreen broad-leaved forest in the rainy area of western China

XIANG Yuanbin, ZHOU Shixing, XIAO Yongxiang, HU Tingxing, TU Lihua, HUANG Congde*, GAO Baodan
College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Laboratory of Forestry Ecology Engineering, the Provincial Key laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, *China*

Abstract: Nitrogen deposition and changes in precipitation patterns are two primary effects of global climate change. In order to understand the effects of both nitrogen deposition and precipitation changes, and their interaction on litter decomposition, in an evergreen broad-leaved forest, from November 2013 to May 2015, an experiment was conducted in situ in the rainy area of western China. The study included six treatments: control (CK), nitrogen deposition (N), water reduction (R), water addition (A), nitrogen deposition × water reduction (NR), and nitrogen deposition × water addition (NA). The results revealed that the leaf decomposition rate was higher than the twig decomposition rate, and litter decomposition was faster in summer than in other seasons. After decomposition for 18 months, the leaf and twig residual rates were 45.86% and 86.67%, respectively. It took 1.42 years for 50% of the leaf litter mass to decompose, which was

基金项目:国家"十二五"科技支撑资助项目(2010BAC01A11);国家自然科学基金资助项目(31300522)
收稿日期:2015-08-11; **网络出版日期**:2016-06-13

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lyyxq100@ aliyun.com

6.19 years shorter than that for twigs. The decomposition coefficient of each treatment was as follows: $k(A) > k(CK) > k(NA) > k(N) > k(R) > k(NR)$, and the residual rate of twig decomposition was N>NR>R>NA>CK>A. The simulated nitrogen deposition, water reduction, and water addition treatments, which were performed to decompose 50% of the leaf litter mass, took 1.79, 1.94, and 1.36 a, respectively; and 8.84, 8.63, and 6.47 a, respectively, to decompose 50% of the litter mass. Each treatment performed to decompose 95% of the leaf litter required 5.37—11.33 a, while decomposition of 95% of the twig litter required 27.41—33.84 a. Under the same nitrogen deposition conditions, water addition treatment promoted the decomposition of leaf litter, while water reduction treatment reduced the decomposition of leaf litter. Under the same precipitation conditions, nitrogen deposition reduced the decomposition of leaf litter. Thus, nitrogen deposition and precipitation changes had a significant effect on litter decomposition, and their interaction effect was not significant ($P > 0.05$). Considering that nitrogen deposition increases continuously and that global climate change is occurring, water addition treatment promoted the decomposition of litter, and nitrogen deposition and water reduction treatment reduced the decomposition of litter in an evergreen broad-leaved forest in the rainy area of western China. Therefore, the interaction between nitrogen deposition and precipitation changes did not have a significant effect on litter decomposition in this forest ecosystem.

Key Words: nitrogen deposition; precipitation change; evergreen broad-leaved forest; litter decomposition

森林凋落物在森林生态系统中占有重要地位,是生态系统养分地球化学循环的基础[1-2]。森林凋落物分解包括水溶性化合物的淋溶、土壤动物对凋落物的破碎、由微生物进行的物质转换以及有机物和矿质化合物向土壤的转化等过程[3]。其分解过程中养分的释放对维持土壤肥力、保持植物再生长、促进生态系统正常的物质循环和养分平衡发挥着重要作用[4-6]。

20 世纪以来,人类活动制造的活性氮已经超过了自然陆地过程制造的活性氮[7]。氮沉降量随着大气中的活性氮的不断增加而升高[8],而过量的氮沉降会引发了一系列的生态问题[7,9]。近几十年,全球的降水格局发生了很大的变化[10-11]。降雨是土壤水分最主要的来源,它能改变土壤通气条件,增加土壤湿度,对地表凋落物和土壤有机质分解、土壤酶活性、植物根系、微生物和植被群落结构和功能产生影响[12-13]。氮沉降的持续增加和降水格局的改变势必会对森林生态系统过程造成影响。氮沉降和降水格局的改变可能会影响或改变森林生态系统过程中的凋落物分解动态。但迄今为止,这一方面的研究还很缺乏。目前,国内外学者展开了一系列的模拟氮沉降对凋落物分解速率影响的研究,但研究的研究结果并不一致,主要有促进作用[14-15]、抑制作用[9,16]和无影响[17-18] 3 种结果,其影响的内在机制有待进一步研究。影响凋落物分解的生物和非生物因子众多,这些因子共同决定了凋落物分解的快慢[19],而氮沉降和降雨都是影响凋落物分解快慢的重要因子,目前的研究忽视了氮沉降和降雨的交互作用对凋落物分解动态的影响或改变。

华西雨屏区处于东部季风区和青藏高原气候区的过渡地带,受东亚季风和印度季风的影响形成四川盆地西部一个多雨的狭长地带[20],属北半球中底纬度,降雨总量有增加的趋势,但局部降雨具有不平衡性[10]。该地区氮沉降主要以湿沉降为主,2008 年总 N 沉降量已经达到 8.24 g/m^2,已经超出了该地区氮沉降临界负荷值,并有逐年上升的趋势[20]。本研究以华西雨屏区常绿阔叶林为研究对象,通过野外原位试验,研究模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林凋落物分解的影响,探讨氮沉降、降雨以及其交互作用对凋落物分解过程的影响和内在机制,旨在氮沉降持续增加和全球气候变化的背景下,为该区域森林生态系统可持续发展和科学管理提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区位于四川省雅安市雨城区碧峰峡(102°90′E, 29°40′N)内,海拔高度为 977.62 m,≥10 ℃年积温

5231 ℃,年均气温为 16.2 ℃,最冷月为 1 月,平均气温 6.1 ℃,最热月为 7 月,平均气温 25.4 ℃,全年地面均温 18.1 ℃。日照长度为 1039.6 h,全年太阳辐射总量为 3640.13 MJ/cm^2。无霜期为 304 d,年平均降水量 1772.2 mm,实验区为地带性的偏湿性亚热带常绿阔叶林,属亚热带湿润季风型山地气候。实验区内植物种类丰富,群落结构复杂。主要有木荷(*Schima superba*)、海桐(*Pittosporum tobira*)、硬斗石栎(*Lithocarpus hancei*)、润楠(*Machilus pingii*)、总状山矾(*Symplocos botryantha*)、柃木(*Eurya japonica*)、青榨槭(*Acer davidii*)、野漆(*Rhus succedanea*)、深裂中华槭(*Acer sinense*)、利川润楠(*Machilus lichuanensis*)和肉桂(*Cinnamomum cassia*)、大叶石栎(*Lithocarpus megalophyllus*)、山茶(*Camellia japonica*)等。土壤类型以黄壤为主,土壤厚度大于 60 cm,林地条件基本一致。

1.2　样地设置

2013 年 10 月在实验地内选取未被破坏的、代表性的林地建立 18 个 3 m×3 m 的样方进行编号,每个样方间设>3 m 的缓冲带。试验设置氮沉降和降水 2 个因素,共 6 种处理,即对照(CK)、氮沉降 15 g N m^{-2} a^{-1}(N)、减雨 10%(R)、增雨 10%(A)、氮沉降 15 g N m^{-2} a^{-1}+减雨 10%(NR)、氮沉降 15 g N m^{-2} a^{-1}+增雨 10%(NA),每种处理重复 3 次,共 18 个处理。各样方四周用 PVC 板材围起,将 PVC 板插入地面 15 cm,用于阻止地表径流的流入,但不影响深层土壤的水分交流。

1.3　氮沉降和降雨模拟

用 NH_4NO_3 和清水进行模拟氮沉降和降雨处理。将年降雨量、施氮量平均分成 24 等分,从 2013 年 11 月 10 日至 2015 年 5 月 25 日,每 15 d 进行 1 次处理,施氮的方法是将每个样方所需 NH_4NO_3 溶解在 2 L 水中,用手提式喷雾器在林地样方 50 cm 高度来回均匀喷洒,非施氮处理样方喷施 2 L 水。按试验区近年来平均降雨量为 1772 mm 计算,增加 10%的降雨量为每年增加 177.2 mm 的降雨量;减水使用自制的减雨架进行模拟减水,减雨架遮挡面积为减水样方面积的 10%。减雨架上端离地 120—140 cm 处,用 5 cm 宽的瓦面状透明 PVC 板凹槽搭建相应面积的挡雨面,并均匀分布在减雨架上面,形成减水的处理。增水用喷雾器在林地样方 50 cm 高度来回均匀喷洒相应的清水量,形成增水处理。

1.4　样品铺设

2013 年 10 月前在阔叶林林地表面铺上尼龙网收集新近凋落的常绿阔叶林凋落叶和直径为 3—5 mm 的小枝,带回实验室自然风干,分别称取叶和枝 20.0 g,分别装入事先准备好的尼龙网分解袋(大小 20 cm×20 cm,上下表面孔径均为 1 mm×0.5 mm)中备用。于 2013 年 11 月初将凋落物分解袋置于样方凋落物层表面,让其自然分解。每个样方放置凋落物叶 27 袋,凋落物枝 18 袋,共计凋落物叶 486 袋,凋落物枝 328 袋。

1.5　样品收集与分析

每 2 个月收集 1 次凋落叶,即 2014 年 1 月、3 月、5 月、7 月、9 月、11 月、2015 年 1 月、3 月、5 月中旬采集,共 9 次;每 3 个月收集 1 次凋落枝,即 2014 年 2 月、5 月、8 月、11 月、2015 年 2 月、5 月中旬采集,共 6 次。凋落袋收集方法为每个样方随机取 3 袋,每个处理共 9 袋。将每次收回的凋落袋内的样品去除泥土、根系等杂物后,在 65℃下烘干至恒重,称重测定其质量损失。取原始凋落物样品测定其初始化学性质(表 1)。每月下旬对样方进行处理前,使用土壤温度计和时域反射仪测定不同处理 0—10 cm 土壤温度和体积含水量(图 1)。

1.6　数据处理

凋落物质量残留率计算公式[9]:

$$M_R\% = (M_t / M_0) \times 100\%$$

对凋落物的质量损失进行 Olson 指数衰减模型拟合:

$$y = a e^{-kt}$$

式中,y 为质量残留率(%);a 为拟合参数;k 为年分解系(kg kg^{-1} a^{-1});t 为时间。凋落物分解 50%($T_{50\%}$)和 95%($T_{95\%}$)所需时间的计算方法为[9]:

$$T_{50\%} = -\ln(1-0.50)/k;\ T_{95\%} = -\ln(1-0.95)/k。$$

利用 Microsoft Excel 2007 完成数据统计分析及图表生成,然后用 SPSS 17.0 软件进行双因素方差分析,比较模拟氮沉降和降雨两种因素对凋落物失重率之间的交互影响。

表 1 不同组分凋落物初始化学成分

Table 1 Initial litter chemical compositions of different litter components

凋落物组分 Litter component	C/(g/kg)	N/(g/kg)	P/(g/kg)	C/N	C/P	N/P
叶 Leaf	430.73±8.71	8.32±1.14	0.42±0.04	51.77±7.64	1015.55±34.68	19.81±2.58
枝 Twig	465.30±7.23	1.64±0.26	0.19±0.02	283.72±27.81	2448.95±53.64	8.63±1.74

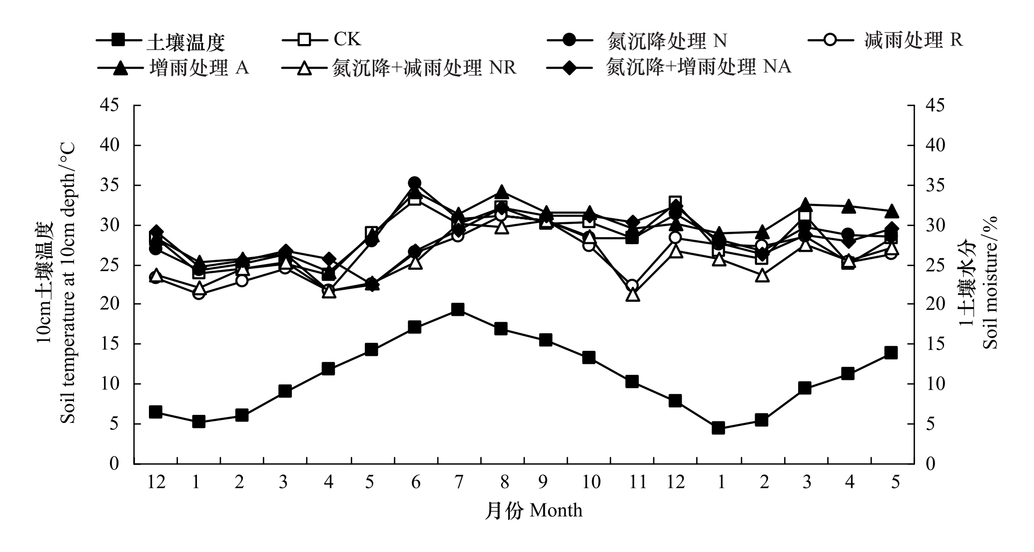


图 1 各处理土壤温度土壤含水量的动态变化

Fig.1 Dynamics of soil temperature and moisture in different treatment

2 结果与分析

2.1 华西雨屏区常绿阔叶林凋落物分解特征

CK 处理代表了自然状态下华西雨屏区常绿阔叶林凋落物的分解。试验期间(图 2,图 3),凋落叶分解较快,凋落枝分解较慢,而且凋落叶的质量残留率显著低于枝条($P<0.05$)。经过 18 个月的分解后,凋落叶的质量残留率为 45.86%,凋落枝的质量残留率为 86.67%。凋落叶在 2014 年 3—9 月质量损失较大;凋落枝在 2014 年 2—8 月质量损失较大。根据 Olson 指数衰减模型(表 2,表 3),凋落叶的分解系数较高,其质量损失 50%和 95%的时间分别为 1.42 和 5.55 a,而凋落枝质量损失 50%和 95%的时间分别为 7.61 a 和 32.21 a。

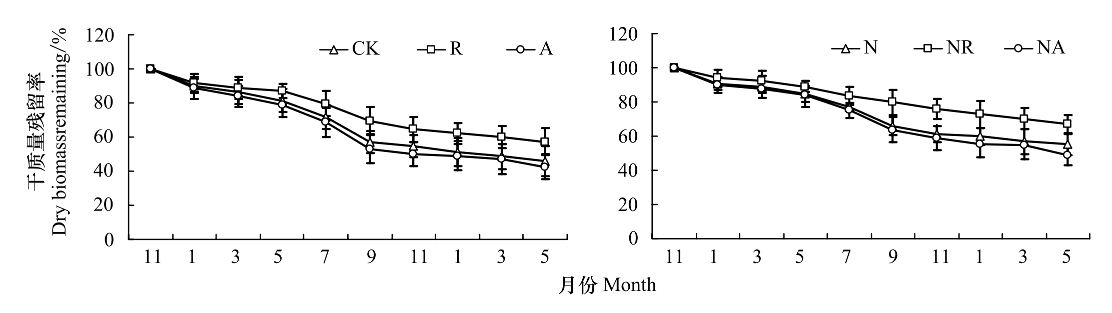


图 2 凋落叶分解过程中干质量残留率的变化

Fig.2 Dynamics of mass remaining rates of leaf litter in the decomposing process

2.2 模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶质量残留率的影响

由图 2 可知,经过 5 次模拟氮沉降和降水处理后,即 2014 年 1 月开始,A 处理明显促进了凋落叶的分解,而 R 和 N 处理抑制的凋落叶的分解,且 5 月份后,R 和 N 处理凋落叶质量残留率显著低于 CK(P<0.05)。经过 18 个月的分解后,N、R、NR 和 NA 的凋落叶质量残留率分别比 CK 高 20.22%、24.94%、45.76%和 6.42%;A 处理的质量残留率分别比 CK 低 3.39%。由表 2 可知,凋落物叶分解系数表现为:k(A)>k(CK)>k(NA)>k(N)>k(R)>k(NR),表明 A 处理分解速率最快,NR 处理分解速率最慢。A 处理凋落叶质量损失 50%和 95%所需时间分别为 1.36 a 和 5.37 a;NR 处理凋落叶质量损失 50%和 95%所需时间分别为 2.75 a 和 11.33 a。由此可见,模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区凋落叶的分解产生了显著的影响。

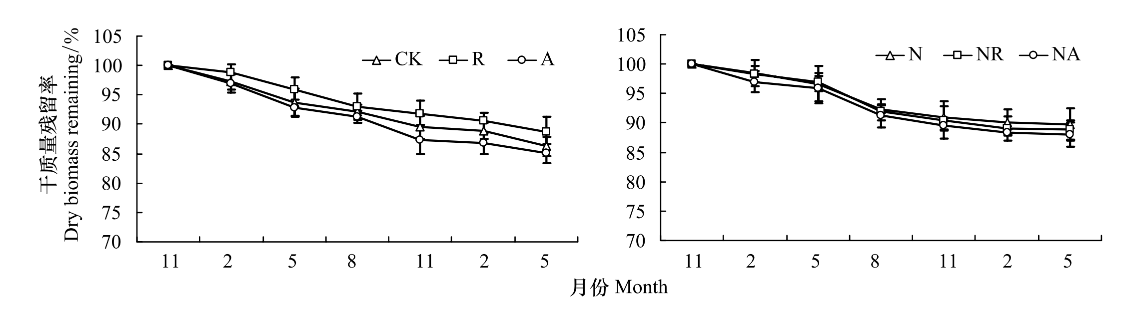


图 3　凋落枝分解过程中干质量残留率的变化

Fig.3　Dynamics of mass remaining rates of twig litters in the decomposing process

表 2　华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解残留率(%)随时间的指数回归方程

Table 2　Regression equations of leaf litter remains in an evergreen broad-leaved forest with different treatment in the rainy area of western China

组分 Components	处理 Treatments	回归方程 Equation	复相关系数 Multiple R^2	分解系数(k) Decomposition rate	半分解时间/a Time of half decomposition	分解 95% 所需时间/a Time of 95% decomposition
叶 Leaf	CK	$y=110.38e^{-0.0930t}$	0.9672	0.0930	1.4192	5.5457
	N	$y=107.20e^{-0.0712t}$	0.9668	0.0712	1.7853	7.1752
	R	$y=107.16e^{-0.0656t}$	0.9730	0.0656	1.9367	7.7868
	A	$y=109.45e^{-0.0958t}$	0.9602	0.0958	1.3630	5.3689
	NR	$y=104.52e^{-0.0447t}$	0.9951	0.0447	2.7493	11.3346
	NA	$y=109.42e^{-0.0814t}$	0.9753	0.0814	1.6035	6.3181

2.3 模拟氮沉降和降雨对华西雨屏区常绿阔叶林凋落枝质量残留率的影响

总体看来(图 3),凋落枝分解较慢,试验期间各处理的质量残留率在 87.26%—89.72%之间。经过 7 次模拟氮沉降和降水处理后,即 2014 年 2 月开始,与凋落叶分解表现相同,A 处理明显促进了凋落枝的分解,而 R 和 N 处理抑制的凋落枝的分解。经过 18 个月的分解后,各处理凋落枝质量残留率表现为 N>NR>R>NA>CK>A;N、R、NR 和 NA 的质量残留率分别比 CK 高 3.52%、2.27%、2.45%和 1.50%,A 的质量残留率分别比 CK 低 1.88%。由表 3 可知,凋落物枝分解系数表现为:k(A)>k(CK)>k(NA)>k(NR)>k(R)>k(N),这表明 A 处理分解速率最快,N 处理分解速率最慢。A 处理凋落叶质量损失 50%和 95%所需时间分别为 6.47 a 和 27.41 a,N 处理凋落枝质量损失 50%和 95%所需时间分别为 8.84 a 和 37.48 a。

2.4 模拟氮沉降和降雨对凋落物分解的交互作用

模拟氮沉降和降雨交互作用下,同一氮沉降条件下,增雨处理促进凋落叶分解,减雨处理抑制凋落叶分解;同一降雨条件下,氮沉降抑制凋落叶分解。凋落物质量损失重复双因素方差分析表明(图 4),氮沉降对凋

落叶和枝的分解产生显著影响($P<0.05$),降雨对凋落叶和枝的分解产生显著影响($P<0.05$),氮沉降和降雨的交互作用对凋落叶、凋落枝的分解影响不显著($P>0.05$)。

表 3 华西雨屏区常绿阔叶林凋落枝分解残留率(%)随时间的指数回归方程

Table 3 Regression equations of twig litter remains in an evergreen broad-leaved forest with different treatment in the rainy area of western China

组分 Components	处理 Treatments	回归方程 Equation	复相关系数 Multiple R^2	分解系数(k) Decomposition rate	半分解时间/a Time of half decomposition	分解 95% 所需时间/a Time of 95% decomposition
枝 Twig	CK	$y=101.90e^{-0.0234t}$	0.9872	0.0234	7.6065	32.2068
	N	$y=101.79e^{-0.0201t}$	0.9324	0.0201	8.8419	37.4810
	R	$y=102.14e^{-0.0207t}$	0.9801	0.0207	8.6271	36.4361
	A	$y=109.92e^{-0.0275t}$	0.9711	0.0275	6.4742	27.4068
	NR	$y=102.26e^{-0.0223t}$	0.9474	0.0223	8.0213	33.8350
	NA	$y=101.58e^{-0.0227t}$	0.9456	0.0227	7.8064	33.1653

表 4 凋落物质量损失重复双因素方差分析

Table 4 Two factor variance analysis of litter mass loss

凋落物组分 Litter component	源 Source	Ⅲ型平方和 Type Ⅲ sum of squares	均方 Meansquare	F 值 F value	显著性 Sig.
叶 Leaf	氮沉降	26.502	26.502	46.036	0.000
	降雨	75.921	37.961	65.941	0.000
	氮沉降×降雨	2.347	1.173	2.038	0.141
枝 Twig	氮沉降	2.073	2.073	12.369	0.001
	降雨	1.836	0.918	5.477	0.007
	氮沉降×降雨	0.922	0.461	2.752	0.074

3 讨论

3.1 常绿阔叶林凋落物分解特征及其影响因素

华西雨屏区常绿阔叶林凋落物分解过程中,凋落叶分解较快,凋落枝分解较慢。与向元彬等[21]对巨桉(*Eucalyptus grandis*)人工林凋落物分解的研究结果一致,经过 18 个月的分解后,凋落叶的质量残留率为 45.86%,凋落枝的质量残留率为 86.67%。凋落物的分解主要受凋落物分解阶段、水热状况、凋落物质量和分解者的影响[9]。在一个特定的气候区内,凋落物基质是凋落物分解速率的主要决定因素[22-24],凋落物分解过程中,C/N 和木质素含量是制约凋落物分解速率最重要的凋落物质量因素,N 素含量低会限制微生物的生长发育,导致凋落物分解速率下降[25-26]。有研究表明 C/N 越低,凋落物分解越快[27]。本研究中,凋落物初始质量差异较大,凋落叶初始 N 含量是凋落枝的 5.07 倍;凋落叶的 C/N 为 51.77,远低于凋落枝的 C/N(283.73),这可能是凋落叶分解速率较快的主要原因之一。另外,凋落叶片厚薄、软硬、是否具蜡质、角质层或较厚的绒毛等都是影响凋落物分解快慢的物理因素[28]。本研究表明,华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶质量损失 50%和 95%的时间分别为 1.42 a 和 5.55 a,而凋落枝质量损失 50%和 95%的时间分别为 7.61 a 和 32.21 a。与巨桉林[21]、马尾松林[22]凋落物分解相比分解较慢。其原因可能是除水热条件差异外,该试验区常绿阔叶林凋落物的主要组成成分为海桐和木荷,都是著名的阻燃防火树种,其叶都为革质或薄革质,表皮细胞壁厚,角质层发达以及可利用碳、氮含量较低,各种微生物不易侵入并分解,而且其枝叶化学性质惰性较高[29-30]。

3.2 模拟氮沉降和降雨对常绿阔叶林凋落物分解的影响

本研究表明,经过 18 个月的分解后,N 处理的凋落叶和凋落枝的质量残留率分别比 CK 高 20.22%和 3.52%,氮沉降抑制了凋落物的分解。这与韩雪、Micks、莫江明等研究研究一致[31-33]。目前,一般认为氮沉降

抑制凋落物分解的原因有以下几个方面:(1)氮沉降后,氮会在土壤中富集,减少氧化酶的基因表达量,从而抑制氧化酶(木质素降解酶)的活性,降低木质素、纤维素的分解[34-36],降低凋落物的分解速率。(2)氮沉降会使大量难分解物化合物累积,促进这类物质发生聚合反应,形成难降解物质,从而降低了凋落物的分解速率[31]。(3)氮沉降会增加土壤中氮的含量,改变系统中营养元素原来的平衡,使其他营养元素的可得性降低,从而抑制参与分解凋落物的微生物的活性[32]。(4)氮沉降还改变了微生物的群落结构,使微生物多样性减少,降低了凋落物的分解速率[31, 37]。但并非所有的研究结果都一致,樊后保等[38]研究表明,氮沉降会促进杉木人工林凋落物的分解。而陈翔等[39]研究模拟氮沉降对兴安落叶松林凋落物分解的影响发现,低氮会促进凋落物的分解,高氮则会抑制凋落物的分解。原因是氮沉降影响了土壤养分元素的平衡,因为氮的输入量也有一定的临界值,如果超过这个临界值,可能就会影响分解者的分解效率。而华西雨屏区全年氮沉降量较高,已经超出了该地区氮沉降临界负荷值[20],并有逐年上升的趋势。外加施氮在土壤中富集后,可能已经超过这个临界值,不再成为限制因子,氮沉降打破了原有的氮平衡,使得凋落物分解减慢。

降雨可以通过淋溶作用直接影响凋落物的分解速率[40-41],同时导致土壤湿度、温度变化,影响土壤生物的活动,间接的影响凋落物的分解速率[42]。Salamanca 等[43]对凋落物进行 0%、50%和 100%遮盖形成雨量减少,结果发现,进行遮盖处理的凋落物分解率减少 19%—26%。一般来说,增加土壤可利用水,通过提高土壤分解者的活动而对凋落物分解有积极作用[44-45]。有研究表明,降雨量在一定范围内,水分越充足其分解越快;但分解速率并不总随水分的增多而加快,如果降雨量超过这个范围,分解就会减慢,甚至会抑制其分解[46]。本研究表明,降雨处理促进了凋落物的分解,减雨处理抑制了凋落物的分解。A 处理凋落叶和凋落枝的质量残留率分别比 CK 低 3.39%和 1.88%;R 处理处理凋落叶和凋落枝的质量残留率分别比 CK 高 24.94%和 2.27%。与李雪峰等[41]对蒙古栎凋落叶分解的研究结果一致。凋落物的水分含量强烈地影响着本身的分解快慢,有研究表明凋落物的水分含量与降雨量、土壤水分含量成正相关关系[47],更温暖湿润的条件可导致凋落物更快的分解[48]。本研究中夏季凋落物分解较快(图 2,图 3),与张梅等[49]对滨海沙地吊丝单竹林凋落物分解的研究一致。原因一方面可能是夏季降雨量大,降雨对凋落物有强烈的物理冲击和淋溶作用,会造成凋落物重量的损失。另一方面可能是夏季水热条件好,几丁质酶、内切纤维素酶等土壤分解酶活性较高,此时微生物的活性也较高,能产生更多的土壤酶,导致凋落物分解加快,而冬季水热条件较差,土壤分解酶的活性较低,微生物活性也较低,导致凋落物分解降低[50]。

3.3　模拟氮沉降和降雨对凋落物分解的交互作用

模拟氮沉降和降雨交互作用下,同一氮沉降条件下,增雨处理促进凋落叶分解,减雨处理抑制凋落叶分解;同一降雨条件下,氮沉降抑制凋落叶分解。凋落物质量损失重复测量方差分析表明,氮沉降对凋落叶和枝的分解产生显著影响,降雨对凋落叶和枝产生显著影响,氮沉降和降雨的交互作用对凋落叶、凋落枝影响不显著($P>0.05$)。凋落物分解是个极其复杂的过程,受凋落物自身性质、土壤肥力、降雨、温度、光照条件、微生物和土壤动物等的影响[19,51-52],而这些因素是共同作用于凋落物分解。而模拟氮沉降和降雨对凋落物的交互作用包含了许多物理生物化学反应,并受其他因素的影响,其产生的效应是综合各种因素的共同结果,其机理有待深入研究。

参考文献(References):

[1] Liu C J, Ilvesniemi H, Berg B, Kutsch W, Yang Y S, Ma X Q, Westman C J. Aboveground litterfall in Eurasian forests. Journal of Forestry Research, 2003, 14(1): 27-34.

[2] 吕瑞恒, 李国雷, 刘勇, 贾黎明, 江萍, 林娜. 不同立地条件下华北落叶松叶凋落物的分解特性. 林业科学, 2012, 48(2): 31-37.

[3] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer-Verlag, 2002.

[4] 万猛, 田大伦, 樊巍. 豫东平原杨-农复合系统凋落物的数量、组成及其动态. 生态学报, 2009, 29(5): 2507-2513.

[5] 任海, 彭少麟, 刘鸿先, 余作岳, 方代有. 小良热带人工混交林的凋落物及其生态效益研究. 应用生态学报, 1998, 9(5): 458-462.

[6] 许晓静, 张凯, 刘波, 兰长春, 徐小牛. 森林凋落物分解研究进展. 中国水土保持科学, 2007, 5(4): 108-114.

[7] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vöosmarty C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. Biogeochemistry, 2004, 70(2): 153-226.

[8] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. Ecological Applications, 1997, 7(3): 737-750.

[9] 李仁洪, 胡庭兴, 涂利华, 雒守华, 向元彬, 戴洪忠, 黄立华. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林凋落物分解的影响. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2588-2593.

[10] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate Change: The IPCC Scientific Assessments. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[11] 张金屯. 全球气候变化对自然土壤碳、氮循环的影响. 地理科学, 1998, 18(5): 463-471.

[12] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, Belnap J, Porporato A, Norton U, Ravetta D A, Schaeffer S M. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. Oecologia, 2004, 141(2): 221-235.

[13] Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(2): 302-311.

[14] Limpens J, Berendse F. How litter quality affects mass loss and N loss from decomposing *Sphagnum*. Oikos, 2003, 103(3): 537-547.

[15] Anderson J M, Hetheringtion S L. Temperature nitrogen availability and mixture effects on the decomposition of heather [*Calluna vulgaris* (L.) Hull] and bracken [*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn] litters. Functional Ecology, 1999, 13(S1): 116-124.

[16] Prescott C E, Blevins L L. Litter decomposition in British Columbia forests influences of forestry activities. Journal of Ecosystems and Management, 2004, 5(2): 30-43.

[17] 廖利平, 马越强, 汪思龙, 高洪, 于小军. 杉木与主要阔叶造林树种凋落物的混合分解. 植物生态学报, 2000, 24(1): 27-33.

[18] Berg B, Ekbohm G. Litter mass-loss rates and decomposition patterns in some needle and leaf litter types. Long-term decomposition in a Scots pine forest. VII. Canadian Journal of Botany, 1991, 69(7): 1449-1456.

[19] 宋飘, 张乃莉, 马克平, 郭继勋. 全球气候变暖对凋落物分解的影响. 生态学报, 2014, 34(6): 1327-1339.

[20] 涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 李仁洪, 戴洪忠, 雒守华, 向元彬. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应. 植物生态学报, 2009, 33(4): 728-738.

[21] 向元彬, 胡红玲, 胡庭兴, 万见中, 普梅, 颜震, 丁云海. 华西雨屏区巨桉人工林凋落物数量及其分解特征. 四川农业大学学报, 2011, 29(4): 465-471.

[22] 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩. 中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态. 环境科学, 2014, 35(3): 1151-1158.

[23] Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. Oikos, 1997, 79(3): 439-449.

[24] 刘文丹, 陶建平, 张腾达, 钱凤, 柴捷, 刘宏伟. 中亚热带木本植物各器官凋落物分解特性. 生态学报, 2014, 34(17): 4850-4858.

[25] Berg B, Johansson M B, Meentemeyer V. Litter decomposition in a transect of Norway spruce forests: substrate quality and climate control. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(7): 1136-1147.

[26] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. 生态学报, 2002, 22(9): 1534-1544.

[27] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 赵玉涛. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系. 应用生态学报, 2008, 19(2): 245-251.

[28] 曾锋, 邱治军, 许秀玉. 森林凋落物分解研究进展. 生态环境学报, 2010, 19(1): 239-243.

[29] 邓长春, 蒋先敏, 刘洋, 张健, 陈亚梅, 和润莲. 高山林线交错带高山杜鹃的凋落物分解. 生态学报, 2015, 35(6): 1769-1778.

[30] 李海涛, 于贵瑞, 李家永, 陈永瑞, 梁涛. 亚热带红壤丘陵区四种人工林凋落物分解动态及养分释放. 生态学报, 2007, 27(3): 898-908.

[31] 韩雪, 王春梅, 蔺照兰. 模拟氮沉降对温带森林凋落物分解的影响. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1503-1508.

[32] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. 生态学报, 2004, 24(7): 1413-1420.

[33] Micks P, Downs M R, Magill A H, Nadelhoffer K J, Aber J D. Decomposing litter as a sink for ^{15}N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation. Forest Ecology and Management, 2004, 196(1): 71-87.

[34] 涂利华, 胡红玲, 胡庭兴, 张健, 雒守华, 戴洪忠. 华西雨屏区亮叶桦凋落叶分解对模拟氮沉降的响应. 植物生态学报, 2012, 36(2): 99-108.

[35] Hassett J E, Zak D R, Blackwood C B, Pregitzer K S. Are basidiomycete laccase gene abundance and composition related to reduced lignolytic activity under elevated atmospheric NO_3^- deposition in a northern hardwood forest?. Microbial Ecology, 2009, 57(4): 728-739.

[36] Blackwood C B, Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L. Molecular analysis of fungal communities and laccase genes in decomposing litter reveals differences among forest types but no impact of nitrogen deposition. Environmental Microbiology, 2007, 9(5): 1306-1316.

[37] Allison S D, Hanson C A, Treseder K K. Nitrogen fertilization reduces diversity and alters community structure of active fungi in boreal ecosystems. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(8): 1878-1887.

[38] 樊后保, 刘文飞, 杨跃霖, 张子文, 曹汉洋, 徐雷. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降增加的响应. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 8-13.

[39] 陈翔, 周梅, 魏江生, 赵鹏武, 李攀, 乌云毕力格, 秦可珍. 模拟氮沉降对兴安落叶松林凋落物分解的影响. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1496-1503.

[40] 宋新章, 江洪, 马元丹, 余树全, 周国模, 彭少麟, 窦荣鹏, 郭培培. 中国东部气候带凋落物分解特征——气候和基质质量的综合影响. 生态学报, 2009, 29(10): 5219-5226.

[41] 李雪峰, 韩士杰, 张岩. 降水量变化对蒙古栎落叶分解过程的间接影响. 应用生态学报, 2007, 18(2): 261-266.

[42] Willcock J, Magan N. Impact of environmental factors on fungal respiration and dry matter losses in wheat straw. Journal of Stored Products Research, 2000, 37(1): 35-45.

[43] Salamanca E F, Kaneko N, Katagiri S. Rainfall manipulation effects on litter decomposition and the microbial biomass of the forest floor. Applied Soil Ecology, 2003, 22(3): 271-281.

[44] Hungate B A, Dijkstra P, Johnson D, Hinkle C R, Drake B G. Elevated CO_2 increases nitrogen fixation and decreases soil nitrogen mineralization in Florida scrub oak. Global Change Biology, 1999, 5(7): 781-789.

[45] Mooney H A, Canadell J, Chapin III F S, Ehleringer J R, Körner Ch, McMurtrie P E, Parton W H, Pitelka L F, Schulze E D. Ecosystem physiology responses to global change//Walker B H, Steffen W L, Canadell J, Ingram J S I, eds. Implications of Global Change for Natural and Managed Ecosystems: A Synthesis of GCTE and Related Research. IGBP Book Series No. 4. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1999: 141-189.

[46] 程煜, 陈灿, 洪伟, 吴承祯, 范海兰. 模拟酸雨及降水量对木荷、马尾松叶凋落物分解的影响. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2009, 38(6): 595-599.

[47] Chen H. Root decomposition in three coniferous forests: effects of substrate quality, temperature, and moisture[D]. Oregon: Oregon State University, 1999.

[48] Bormann F H, Likens G E, Siccama T G, Pierce R S, Eaton J S. The export of nutrients and recovery of stable conditions following deforestation at Hubbard Brook. Ecological Monographs, 1974, 44(3): 255-277.

[49] 张梅, 郑郁善. 滨海沙地吊丝单竹林凋落物分解及养分动态研究. 西南林学院学报, 2008, 28(3): 4-7.

[50] 张鹏, 田兴军, 何兴兵, 宋富强, 任利利. 亚热带森林凋落物层土壤酶活性的季节动态. 生态环境, 2007, 16(3): 1024-1029.

[51] 郭晋平, 丁颖秀, 张芸香. 关帝山华北落叶松林凋落物分解过程及其养分动态. 生态学报, 2009, 29(10): 5684-5695.

[52] 罗媛媛, 袁金凤, 沈国春, 赵谷风, 于明坚. 常绿阔叶林片段中木荷凋落叶分解速率及中小型土壤节肢动物群落的结构动态. 应用生态学报, 2010, 21(2): 265-271.